
Investigación e Innovación Educativa en Docencia Universitaria.

Retos, Propuestas y Acciones

Edición de.

Rosabel Roig-Vila
Josefa Eugenia Blasco Mira
Asunción Lledó Carreres
Neus Pellín Buades

Prólogo de.

José Francisco Torres Alfosea
Vicerrector de Calidad e Innovación Educativa
Universidad de Alicante

Edición de:

Rosabel Roig-Vila
Josefa Eugenia Blasco Mira
Asunción Lledó Carreres
Neus Pellín Buades

© Del texto: los autores (2016)

© De esta edición:

Universidad de Alicante
Vicerrectorado de Calidad e Innovación educativa
Instituto de Ciencias de la Educación (ICE) (2016)

ISBN: 978-84-617-5129-7

Revisión y maquetación: Neus Pellín Buades

Experiències senzilles d'electromagnetisme: Atracció i repulsió per forces magnètiques. Caiguda d'imant a càmera lenta

Isabel Abril¹, Wynand Dednam^{1,2}, José Lado Villanueva³, Noel A. García-Martínez³,
Vicent Esteve¹, Marina Garcia-Abril⁴, Inti Garcés¹, Rafael Garcia-Molina⁵

¹*Departament de Física Aplicada, Universitat d'Alacant, E-03080 Alacant, Spain*

²*Department of Physics, Science Campus, University of South Africa, Private Bag X6,
Florida Park 1710, South Africa*

³*International Iberian Nanotechnology Laboratory (INL), Av. Mestre José Veiga, 4715-330
Braga, Portugal*

⁴*Department of Electronic Engineering, National University of Ireland Maynooth, Irlanda*

⁵*Departamento de Física - Centro de Investigación en Óptica i Nanofísica,
Regional Campus of International Excellence "Campus Mare Nostrum",
Universidad de Murcia, E-30100 Murcia, Spain*

RESUM

La realització d'experiments científics és una activitat pedagògica que afavoreix l'aprenentatge significatiu dels alumnes, la seua motivació per la matèria i estimula l'interès per ampliar coneixements. En aquest treball presentem dues experiències senzilles de fenòmens d'inducció electromagnètica, amb el propòsit que els estudiants compreguen els principals conceptes involucrats i l'estreta relació entre l'electricitat i el magnetisme. El nivell d'aquests experiments és adequat per a segon curs de batxillerat, per a qualsevol curs introductori de Física en els Graus de Ciències i per a l'alumnat del Màster d'Educació Secundària.

Paraules clau: física; física recreativa; experiments senzills; conceptes físics; recursos didàctics; electromagnetisme; inducció electromagnètica.

1. INTRODUCCIÓ

Tant en la Física, com en qualsevol disciplina científica, és essencial provocar en l'alumne la curiositat i la inquietud per aprendre. S'ha comprovat que la realització d'experiments senzills, que pot realitzar el mateix estudiant, incentiva el seu interès per la Física, ja que d'aquesta manera participa activament en l'execució de l'experiment i per tant s'involucra en l'explicació i comprensió del fenomen físic que està produint-se [Caamaño 1992, Garcia-Molina 2011].

La realització d'experiències sorprenents i motivadores constitueix un bon instrument perquè l'estudiant expose les seues idees i explicacions dels fenòmens i formule les seues pròpies hipòtesis i propostes de resolució. Aquest ambient farà que es fomenti la discussió i l'intercanvi d'idees i conceptes físics entre els alumnes, sempre guiats i orientats pel seu professor [Garzón Florez i Florez 2006]. Encara que inicialment els conceptes exposats pels alumnes puguen ser ambigus i imprecisos, la formulació d'hipòtesis per a entendre un experiment és l'element bàsic que facilitarà la construcció i assimilació d'idees i conceptes nous, i potser posaran en dubte algunes de les seues idees preconcebudes [Meneses Villagrà i Caballero Sahelices 1995, Sokoloff i Thornton 1997].

Amb aquest tipus d'experiències es fomenta l'aprenentatge actiu, on el protagonista del procés educatiu és el propi alumne, qui realitzarà les tasques experimentals d'observació del fenomen, predicció dels resultats, mesures, anàlisi crític, explicació, contrastament i comparació dels resultats. Tot això propiciarà una millor construcció del seu coneixement. D'aquesta manera volem que els estudiants canvien les seues creences i conceptes quan tinguen que comparar les seues prediccions amb les seues pròpies observacions experimentals i que, d'aquesta manera, es pugui promoure la seua capacitat d'anàlisi [Benegas 2007].

En aquest treball discutim dues experiències senzilles i vistoses d'electromagnetisme, que ens permetran reforçar i identificar conceptes físics molt importants que sovint presenten problemes de comprensió per part de l'estudiant [Colombo de Cudmani i Fontdevila 1990]. Així, volem deixar clar que l'electricitat i el magnetisme són dues manifestacions d'un mateix fenomen: l'electromagnetisme. També volem aclarir els conceptes de camp i la confusió que a vegades tenen els estudiants entre el camp elèctric i el camp magnètic. També volem introduir als alumnes en els fenòmens d'inducció electromagnètica, ja que és ben coneguda la dificultat del seu aprenentatge [Almudí *et al.* 2005]. D'aquesta manera pretenem que els

alumnes puguen superar i aclarir les seues concepcions incorrectes [Guisasola *et al.* 2004, Mukhopadhyay 2006].

Els fenòmens electromagnètics es troben presents de forma predominant al nostre món, tant a escala macroscòpica com microscòpica. Així, la interacció electromagnètica determina l'estructura atòmica, ja que els electrons es mantenen units al nucli mitjançant aquesta interacció; a més, la formació de molècules és deguda a la força electromagnètica exercida entre els electrons i nuclis dels àtoms propers. També són resultat de la interacció electromagnètica les forces que apareixen en altres àrees de la Física: la fricció, la tensió superficial o l'empenta. Així doncs, la majoria de les forces que apareixen a la nostra vida quotidiana (excepte la força gravitatòria) són d'origen electromagnètic. Per altre costat, l'estudi i l'interès per l'electromagnetisme és fonamental en la nostra civilització basada en la tecnologia, en la producció d'energia elèctrica i la seua aplicació en motors, generadors, enllumenat, aparells mèdics i biològics, etc. [Pramanik 2009].

Podem afirmar que pràcticament tota la tecnologia que es troba al nostre abast (telèfon, internet, ràdio, televisió, electrodomèstics...) està basada en algun concepte d'electromagnetisme. Així, un coneixement bàsic de l'electromagnetisme introduirà l'estudiant al desenvolupament del pensament científic i li proporcionarà una millor comprensió del món que l'envolta.

El primer experiment que discutim en aquesta comunicació consisteix en dos circuits separats espacialment pel quals circula un corrent elèctric, i té com a finalitat provar que qualsevol càrrega elèctrica en moviment genera un camp magnètic i, per tant, aquests dos circuits elèctrics poden experimentar atracció o repulsió com si es tractarà de dos imants. L'altra experiència que presentem és la caiguda d'un imant a través d'un tub de metall no ferromagnètic, la qual cosa dona lloc a la inducció d'un corrent elèctric produït per la variació de flux magnètic (degut a l'imat) i a una força magnètica que s'oposa al moviment de l'imat. Amb la realització d'aquests experiments volem consolidar diversos conceptes d'electromagnetisme, estimular la curiositat de l'alumnat i el plaer per la investigació i el descobriment de nous fenòmens físics.

L'esquema que seguirem per a cada experiment és el següent. Inicialment s'exposaran els objectius que volem transmetre amb aquesta experiència, després enumerem els materials necessaris i fem una descripció detallada amb fotografies del muntatge experimental. A continuació expliquem minuciosament el fonament teòric en

què està basat aquest experiment i, per últim, exposem els conceptes que cal treballar. Aquests experiments s'han dissenyat i realitzat al Departament de Física Aplicada de la Universitat d'Alacant.

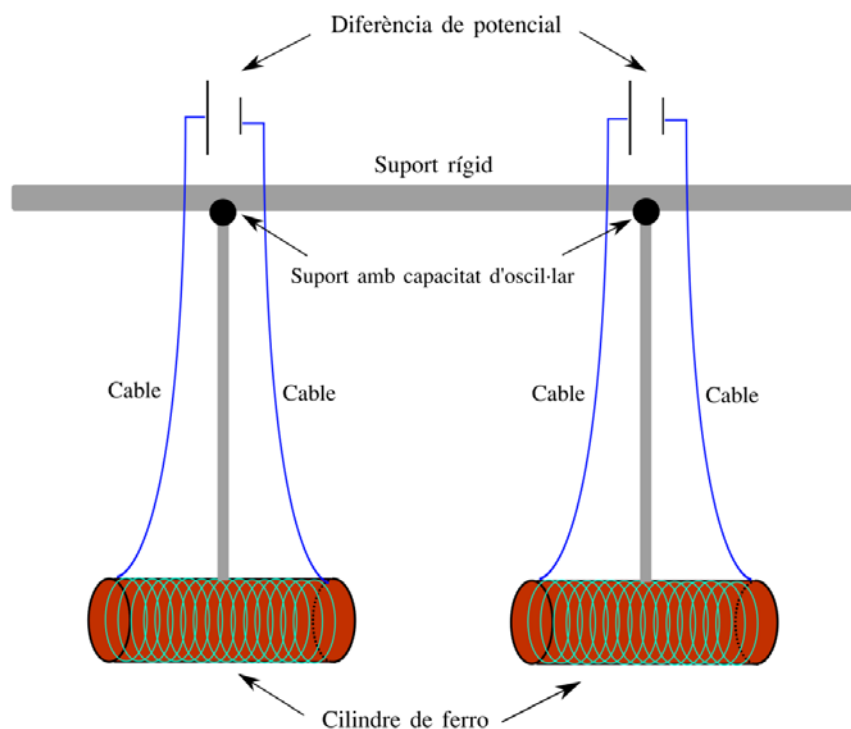
2. ATRACCIÓ I REPULSIÓ PER FORCES MAGNÈTIQUES

Objectiu: Demostrar que una càrrega elèctrica en moviment genera un camp magnètic. Mostrar que un corrent elèctric genera un camp magnètic. Observar com dos circuits de corrent separats espacialment són capaços d'exercir força entre ells i, per tant, poden atreure's o repel·lir-se. Demostrar que els camps electromagnètics poden fer treball.

Paraules clau: Camp magnètic; corrent elèctric; electromagnetisme; electroimant.

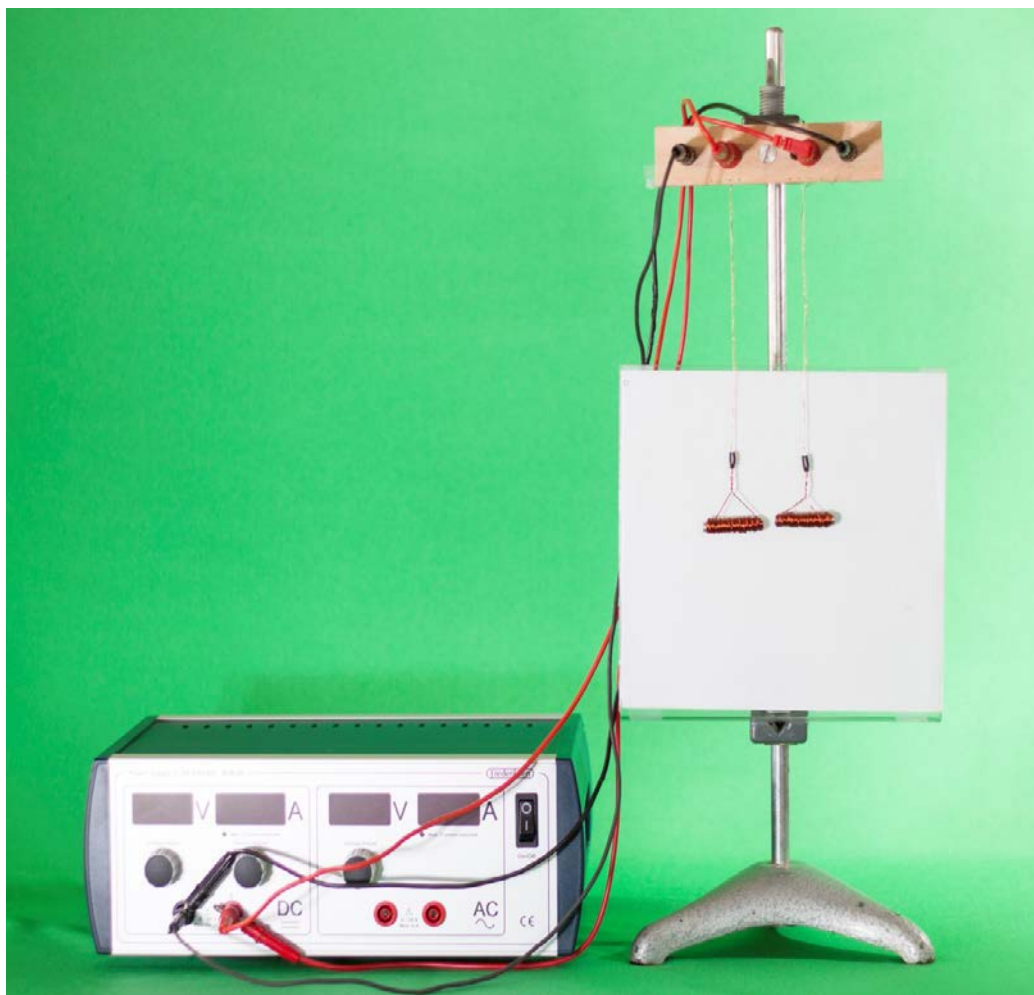
Materials: Dos cilindres de ferro dolç de 5.5 mm de diàmetre per 40 mm d'altura. Cable de coure esmaltat de 0.6 mm de diàmetre. Font d'alimentació de 0-24 V AC/DC. Cables i tauleta de connexió. Suport amb vareta de 50 cm. 2 nous de subjecció.

Figura 1. Esquema del muntatge experimental.



Descripció del muntatge experimental: Consisteix en dos pèndols, on el pes de cadascun està format per un cilindre de ferro dolç. Cada cilindre té enrotllat 100 vegades el cable de coure, formant una espiral. A les figures 1 i 2 presentem, respectivament, l'esquema d'aquest muntatge i la fotografia d'aquest experiment tal com s'ha preparat al laboratori del Departament de Física Aplicada. Els extrems de cadascun dels cables es connectaran a una font de corrent continu, com hem fet en aquest cas, o a una pila. Quan l'electricitat circule pels cables observarem que els dos pèndols s'atrauran o repel·liran, depenent de la polaritat relativa entre ells.

Figura 2. Fotografia del muntatge experimental.



Fonament teòric: En la vida quotidiana, l'electricitat i el magnetisme semblen fenòmens molt diferents, tot i que les dues forces ens permeten moure objectes a distància. Per exemple, podem generar electricitat estàtica fàcilment mitjançant la

fricció entre un globus i una peça de roba i vore com el globus pot atraure un raig d'aigua prim. També podem vore com qualsevol imant casolà és capaç d'atraure certs metalls, com el ferro. No obstant açò, i en contraposició als anteriors experiments, no som capaços de corbar un raig d'aigua amb un imant (almenys, dels que tenim a les nostres cases!), de la mateixa forma que som incapaços d'atraure un tros de ferro amb un globus electritzat. Ens preguntem si són realment diferents aquestes dues forces i si actuen sobre diferents materials, si seríem capaços de moure un tros de metall a distància amb electricitat només o si seria possible fer que aquestes forces puguin atraure o repel·lir objectes segons ens convinga, o estem condemnats al fet que la interacció sempre siga atractiva?

L'experiment que hem descrit anteriorment sobre l'atracció i repulsió de dos cilindres metàl·lics enrotllats per un circuit elèctric quan estan connectats a una font de corrent elèctric ens ajudarà a respondre les preguntes anteriors.

Començarem explicant el concepte de camp. Aquest concepte és molt genèric i pot ser aplicat a molts casos diferents (camp elèctric, camp magnètic, camp gravitatori, camp de temperatures...). Podem entendre un camp simplement com una funció que ens permet assignar un valor a un punt de l'espai. Per exemple, podem definir un camp de temperatures com una funció que en qualsevol punt de l'espai ens retorna la temperatura en aquell punt. Un camp també pot donar informació vectorial, per exemple, el camp gravitatori creat per la Terra és una funció tal que, per a unes coordenades donades, ens diu com de forta i cap a on apunta la força que sentiria un objecte col·locat en aquest punt. De la mateixa manera es poden definir els camps magnètic i elèctric.

Suposem que tenim un imant i un tros de ferro. L'imat seria el creador d'un camp magnètic (igual que la Terra crea un camp gravitatori) i el tros de ferro seria un objecte que pot sentir el magnetisme. És a dir, l'imat crea una pertorbació en tot l'espai que afectarà al ferro. A aquesta pertorbació l'anomenarem camp magnètic. Per altre costat, el ferro té una propietat, denominada moment magnètic, que és la responsable que es puga sentir atret pel camp magnètic creat per l'imat i, per això, notarà una força. Podem pensar que tindre el tros de ferro a una certa distància de l'imat és anàleg a tindre una pedra a una certa altura i, de la mateixa forma que la pedra cau a terra quan la soltem, el tros de ferro s'aproparà a l'imat quan el soltem. En tots dos casos, el ferro i la pedra tenen el que anomenem "energia potencial", el que significa que tenen el potencial d'adquirir velocitat per si mateixos, transformant aquesta energia potencial en

energia cinètica. Així, el mateix paper que juga el camp gravitatori per a la pedra, és el que juga el camp magnètic per al tros de ferro.

Resumint, al cas del camp gravitatori podem definir una energia potencial com l'energia que té un cos pel fet d'estar en un cert punt del camp, ja que aquesta energia pot (té el potencial de) convertir-se en energia cinètica. Anàlogament, per al cas d'un imant en un camp magnètic podem definir una energia potencial magnètica amb el mateix significat. En el cas que l'imant i el camp magnètic es troben alineats i si suposem que podem treballar en una dimensió (per a simplificar les equacions), l'energia potencial magnètica s'expressa mitjançant la següent expressió [Tipler i Mosca 2011]:

$$E(x) = -mB(x) \quad (2.1)$$

on m és el moment magnètic, que és una característica de l'imant, i B és el camp magnètic en l'espai.

Les forces elèctriques i magnètiques, encara que semblen dues forces totalment diferents i independents, estan íntimament relacionades. En general, sempre que un camp elèctric canvia amb el temps es generarà un camp magnètic. De la mateixa forma, un camp magnètic que canvia amb el temps generarà un camp elèctric. Per exemple, si considerem un conjunt de càrregues estàtiques només podrem observar un camp elèctric. En el moment que aquestes càrregues es mouen (respecte de nosaltres) observarem l'aparició d'un camp magnètic. Ara, si considerem un conjunt de càrregues (per exemple positives) que es mouen en un sentit, i un altre conjunt de càrregues amb signe oposat (negatives) que es mouen en sentit contrari, els camps elèctrics es cancel·laran (ja que seran iguals, però amb signe contrari) i resultarà un camp elèctric total nul, però els camps magnètics se sumaran.

Així, si fem passar un corrent elèctric per un circuit circular, com tenim en el nostre experiment, es generarà un camp magnètic, i aleshores el circuit es comportarà com un imant. Canviar la polaritat del circuit és equivalent a canviar la polaritat de l'imant, tal i com es representa a la figura 3.

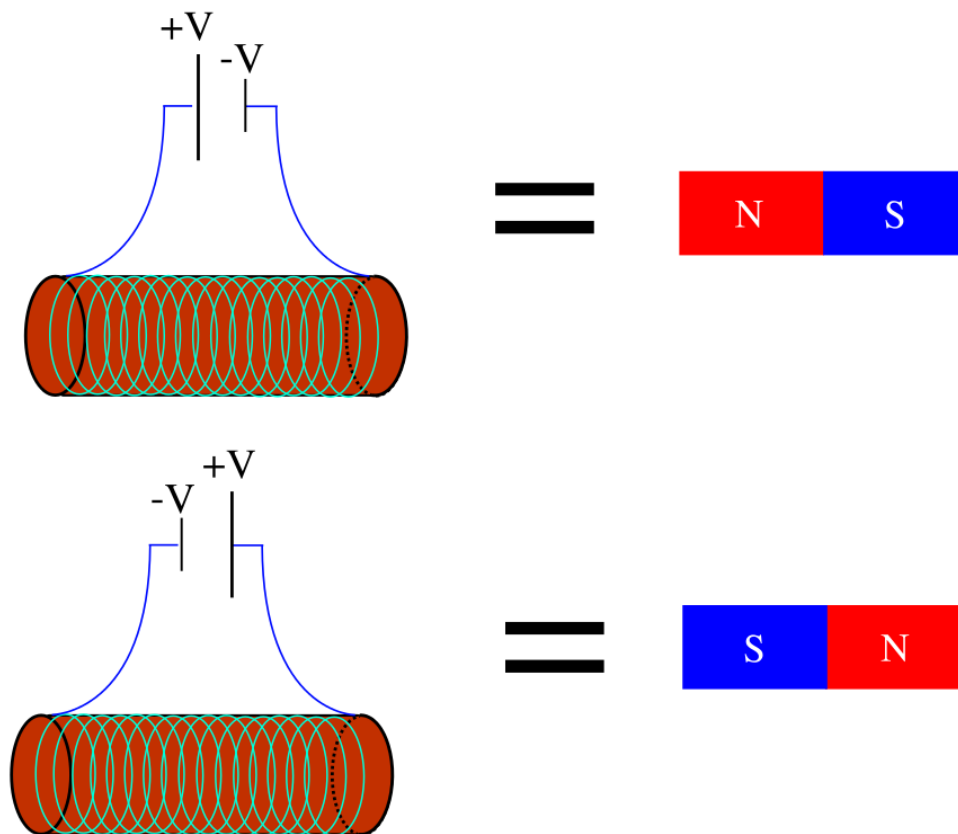
De la mateixa forma que la massa caracteritza el camp gravitatori, i la càrrega caracteritza el camp elèctric que crea un objecte, la magnitud que caracteritza un camp magnètic és el moment magnètic m , introduït a l'eq. (2.1). En particular, si estem interessats en crear un camp magnètic utilitzant un corrent elèctric ho podem aconseguir enrotllant un cable sobre si mateix N vegades, formant un cilindre de N espises amb

secció S , i fent-hi passar un corrent elèctric d'intensitat I . En aquest sistema, que correspon al nostre experiment, el moment magnètic creat serà:

$$m = NIS = NI\pi a^2 \quad (2.2)$$

on a és el radi de l'escira. És important adonar-se que el moment magnètic m canvia de signe si es canvia el sentit del corrent elèctric.

Figura 3. Esquema d'un corrent elèctric que genera un camp magnètic i es comporta com un imant.



El camp magnètic creat a una distància x per un moment magnètic m val [Griffiths 2014]:

$$B(x) = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{m}{x^3} \quad (2.3)$$

on μ_0 és la permeabilitat del buit; quan els moments magnètics no són col·lineals, l'expressió del camp magnètic és més complexa, i en general hi apareixen torques.

En el cas del tub de N espises, a distàncies allunyades al llarg de l'eix del tub (paral·lel al moment magnètic m), el camp magnètic generat pel corrent elèctric serà

$$B(x) = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{NI\pi a^2}{x^3} \quad (2.4)$$

D'aquesta manera hem demostrat que podem generar un camp magnètic fent passar un corrent elèctric a través d'un conjunt d'espines, i que si canvien el sentit del corrent elèctric canviarà també el signe del camp magnètic generat.

Tenint en compte que un imant és capaç d'atraure un tros de ferro, sembla evident que podem fer treball amb una força magnètica. En el nostre experiment no tenim un imant, però hem sigut capaços de crear un "imant artificial" mitjançant un corrent elèctric, és a dir, hem creat un electroimant.

Si coneixem l'energia d'un sistema en funció de la seua posició podem definir la força F exercida sobre un objecte com la variació de la seua energia E en moure'l una distància Δx ,

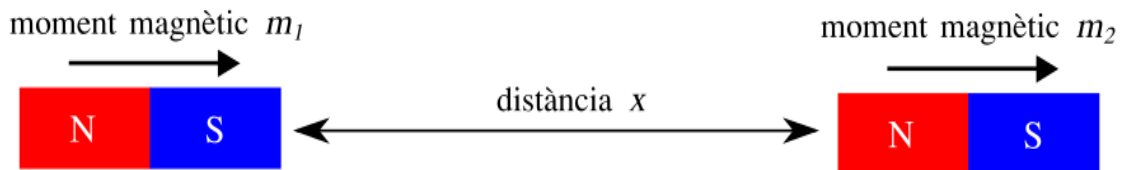
$$F(x) = -\frac{E(x+\Delta x)-E(x)}{\Delta x} \quad (2.5)$$

Si tenim en compte l'equació (2.1), un imant amb un moment magnètic m que es troba en un camp magnètic B que varia en l'espai sentirà una força magnètica:

$$F_M(x) = m \frac{B(x+\Delta x)-B(x)}{\Delta x} \quad (2.6)$$

En el nostre experiment tenim dos electroimants amb moments magnètics m_1 i m_2 . Un dels imants crea un camp magnètic, de tal manera que l'altre imant sentirà una força magnètica que ve donada per l'equació (2.6); anàlogament per a l'altre imant. A la figura 4, mostrem l'esquema del dos electroimants, on hem substituït les bobines recorregudes per corrent elèctric per sengles imants.

Figura 4. Esquema dels dos electroimants.



Per altre costat, el camp magnètic creat per l'imant es va fent més feble a mesura que ens allunyem d'aquest imant, així suposarem que la força magnètica és la corresponent a la d'un dipol, i ve donada per [Griffiths 2014]:

$$F_M(x) = \frac{3\mu_0}{2\pi} \frac{m_1 m_2}{x^4} = \Lambda \frac{l_1 l_2}{x^4} \quad (2.7)$$

on x és la separació entre els cilindres, $I_{1(2)}$ són les intensitats de corrent que circulen per cadascun dels cilindres formades per les espires de coure, i Λ és una constant que depèn de la geometria de les espires i del nombre d'espires que formen cada cilindre.

L'expressió usada per al camp magnètic generat per a un dipol només és vàlida per a distàncies grans, ja que per a distàncies curtes apareixen contribucions degudes a termes multipolars d'un ordre més gran. De tota manera això no afecta la discussió qualitativa de l'experiment.

De l'equació (2.7) podem deduir que si invertim el sentit dels dos corrents elèctrics el signe de la força magnètica no canvia. Per contra, si només un dels corrents s'inverteix, la força magnètica passarà de ser atractiva a ser repulsiva (o al contrari).

Amb aquest experiment hem demostrat que és possible crear un camp magnètic fent circular un corrent elèctric per un conjunt d'espires enrotllades (que formen un cilindre); això constitueix un electroimant. També hem comprovat que quan s'inverteix el sentit del corrent s'inverteix la polaritat del camp magnètic, la qual cosa resulta en una atracció o repulsió entre els dos electroimants.

Volem ressaltar que el camp magnètic generat en aquest experiment no és degut a la variació en el temps de camps elèctrics, ja que els dos camps que intervenen en aquest experiment, elèctric i magnètic, són constants.

Conceptes que cal reforçar o consolidar: Una càrrega en repòs genera un camp elèctric, mentre que una càrrega en moviment també genera un camp magnètic. L'electricitat i el magnetisme són dos aspectes del mateix fenomen físic. La força magnètica pot realitzar treball.

3. CAIGUDA D'IMANT A CÀMERA LENTA

Objectiu: Discutir la inducció d'un corrent elèctric deguda a un flux variable de camp magnètic, i demostrar que l'electricitat i el magnetisme estan íntimament relacionats. Utilitzar la tercera llei de Newton i el concepte de velocitat terminal. Mesurar la massa d'un imant que cau per un tub de metall utilitzant l'equilibri entre forces oposades, que són la gravetat i la força magnètica induïda per un corrent elèctric.

Paraules clau: Camp magnètic; inducció electromagnètica; corrent elèctric; llei de Faraday-Lenz; velocitat terminal; primera llei de Newton; tercera llei de Newton.

Materials: 5 imants petits de neodimi en forma de disc. Un tub de coure, un altre de d'alumini i altre de PVC d'un metre de llargària, aproximadament, i amb un diàmetre interior lleugerament més gran que el dels imants; cal que el tub d'alumini tinga dos forats en el seu extrem, per poder penjar-lo. Un filferro de 10 cm doblegat en forma de U. Un dinamòmetre. Un cronòmetre. Una caixa de cartó. Una esponja. Suport amb vareta de 50 cm. Nou de subjecció.

Descripció del muntatge experimental: Es penja el dinamòmetre de l'estructura estable de la vareta amb suport. Del ganxo del dinamòmetre penja el filferro que està doblegat en forma de U. Aquest filferro acaba en dos ganxos menuts, els quals s'enganxen als forats del tub d'alumini, de manera que el dinamòmetre i el tub alineats verticalment, tal i com es pot vore a la figura 5. S'ha de penjar el dinamòmetre a una altura suficientment alta des de terra per tal de posar la caixa amb l'esponja per sota de l'extrem inferior del tub; això servirà per a esmorteir l'impacte de la caiguda de l'imant quan isca pel forat inferior del tub.

L'imant que deixarem caure pel tub és un cilindre format per cinc imants de neodimi amb forma de disc, ja que aquest és un material amb un camp magnètic molt fort. S'ha de prestar atenció quan preparem aquest cilindre d'imants, ja que la força entre ells és tan intensa que ens poden aixafar els dits.

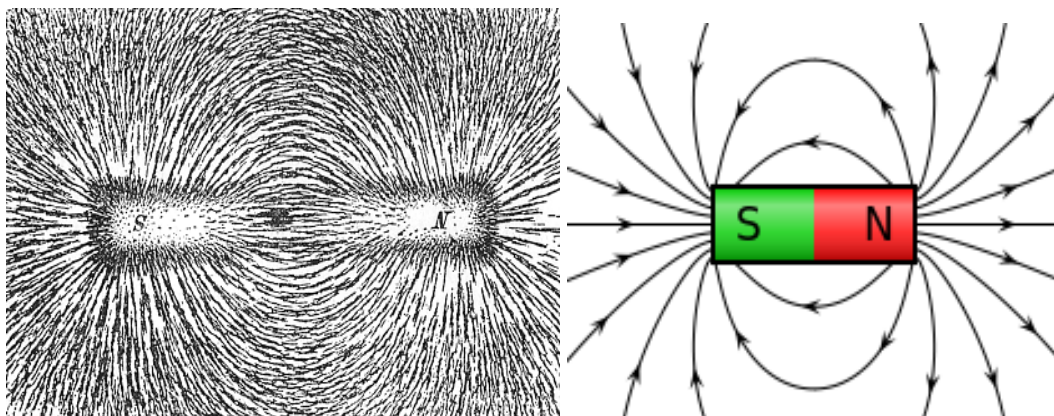
Primer deixarem caure el cilindre d'imants a través del tub de PVC, i cronometrarem el temps que tarda en caure a través del tub fins a eixir per baix. Repetirem la mateixa experiència amb els altres dos tubs, el d'alumini i el de coure, i anotarem el temps que tarda l'imant en caure. Per altra banda, apuntarem el valor que marca el dinamòmetre abans d'introduir l'imant en el tub i mentre que l'imant cau pel tub. Trobes alguna diferència entre el comportament de l'imant quan cau a través del tub de PVC, el tub d'alumini o el de coure?

Figura 5. Fotografia del muntatge experimental.



Fonament teòric: Seguidament explicarem per què la caiguda de l'imant a través dels tubs de coure o d'alumini es ralenteix molt, però no quan cau a través del tub de PVC [Garcia-Molina 2009]. L'origen d'aquest fenomen és degut a la llei de Faraday-Lenz, que és una de les lleis més importants de l'electromagnetisme. Aquesta llei estableix que la força electromotriu induïda a una espira és igual al ritme de variació del flux magnètic al llarg de l'espira; la força electromotriu induïda té sentit oposat a la causa que la produeix [Tipler i Mosca 2011]. En el cas d'un imant que cau per l'interior d'un tub hi ha una variació del flux magnètic que travessa una determinada secció del tub. Per això, al cilindre que limita aquesta secció s'indueix una força electromotriu, que produeix un corrent elèctric si el material del cilindre és conductor.

Figura 6. Línies del camp magnètic produït per un imant rectangular, visualitzades amb llimadures de ferro (esquerra) i representades de forma esquemàtica (dreta).



Com el tub de PVC és un material aïllant, el flux variable del camp magnètic creat per l'imant que està caient no pot induir un corrent elèctric; en tubs metàl·lics de coure o d'alumini sí que s'indueix un corrent elèctric.

En el cas que ens ocupa, la llei de Faraday-Lenz condueix a la següent equació [Tipler i Mosca 2011]:

$$I = -\frac{1}{R} \frac{d\phi}{dt} \quad (3.1)$$

on I representa el corrent elèctric induït en el tub conductor pel quan està caient l'imant (i per tant, està variant el flux del camp magnètic), R representa la resistència elèctrica del material de què està fet el tub (en aquest cas d'alumini o de coure) i ϕ és el “*flux magnètic*” que travessa la secció del tub, que es defineix com la densitat de línies de

camp magnètic (representades a la figura 6)¹ que travessa una secció del tub per on l'imant està caient en un determinat moment. Si el flux magnètic és constant, $\frac{d\phi}{dt} = 0$, segons l'equació (3.1) no hi haurà corrent elèctric induït.

En el nostre experiment tenim que l'imant està caient pel tub i, per tant, el seu flux magnètic canvia amb el temps, la qual cosa donarà lloc a una força electromotriu induïda i, per tant, a un corrent elèctric induït. A la figura 7 hem representat una imatge esquemàtica de quan l'imant cau per una secció concreta dins del tub, per exemple en la zona central. Com les línies de camp magnètic no són homogènies al voltant de l'imant (perquè el camp magnètic disminueix amb la distància), aquesta part de la secció del tub es travessada per un camp magnètic variable i, en conseqüència, un flux magnètic que canvia amb el temps. Per la llei de Faraday-Lenz, aquest flux magnètic variable indueix al seu torn un corrent elèctric en la circumferència d'aquesta secció del tub.

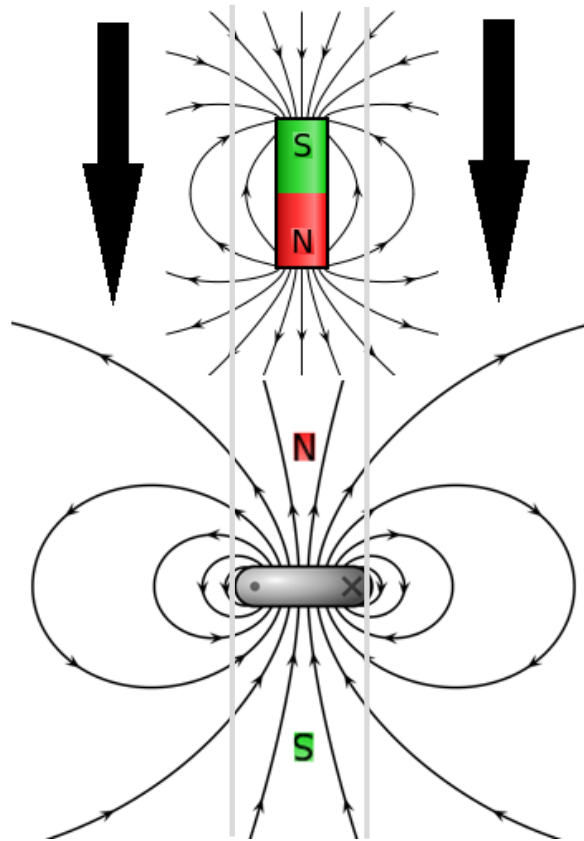
El signe negatiu a la llei de Faraday-Lenz, que apareix a l'equació (3.1), ens indica el sentit del corrent elèctric induït, que dóna lloc a un camp magnètic que s'oposa al canvi de flux que l'ha produït. Així, en l'esquema que hem representat a la figura 7,² el corrent elèctric induït té sentit antihorari (vist des de dalt del tub). Per altra banda, tal i com hem après a l'experiment anterior, qualsevol corrent elèctric genera al seu torn un camp magnètic. Per això es genera en el tub un altre camp magnètic (vegeu la part inferior de la figura 7) que té el seu pol nord enfrontat al pol nord de l'imant que cau. El valor d'aquest camp magnètic produït pel corrent elèctric està donat per la llei de Biot-Savart [Tipler i Mosca 2011].

El camp magnètic del corrent induït s'oposa al camp magnètic de l'imant que cau. Per això, la seua caiguda es veu afectada per una força de frenada (deguda a la interacció entre els camps magnètics) a més de la força de la gravetat (que actua en el mateix sentit que el moviment de caiguda).

¹ https://en.wikipedia.org/wiki/magnet#/media/File:VFPT_cylindrical_magnet_thumb.svg; <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Magnet0873.png>

² https://en.wikipedia.org/wiki/File:VFPT_dipole_magnetic3.svg.

Figura 7. (Part superior) Imant que cau per l'interior d'un tub metàl·lic, representat per les línies vertical grises; les fletxes indiquen la direcció de caiguda. (Part inferior) Secció del tub, representat per un anell gris. En la circumferència del tub s'indueix un corrent elèctric en sentit contrari a les agulles del rellotge vist des de dalt del tub (la "x" indica que el corrent induït entra a la pàgina, mentre que el "•" indica que el corrent ix cap a fora de la pàgina). El corrent elèctric induït genera un camp magnètic que s'oposa al camp magnètic de l'imat.



En aquest experiment hem trobat que el temps de caiguda de l'imat dins del tub de coure és major que quan cau pel tub d'alumini. Això és a causa de la diferència que hi ha entre la resistivitat del coure ($1.71 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$) i la de l'alumini ($2.82 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$). Si considerem que els tubs tenen les mateixes característiques geomètriques, la resistència del de coure és menor que la del d'alumini. Segons l'equació (3.1), en el tub de coure s'indueix un corrent elèctric major que en el tub d'alumini i, en conseqüència, el camp magnètic induït per l'imat és més fort al tub de coure. Per aquesta raó es troba que el temps de caiguda de l'imat a través del tub de coure és major que en el tub d'alumini, encara que els dos tubs tinguin la mateixa longitud.

Durant l'experiment s'ha observat que el pes del tub mesurat quan penja del dinamòmetre s'incrementa quan l'imat cau pel tub de coure o d'alumini. Com que

l'ímant indueix un corrent elèctric en el tub quan hi cau, que al seu torn genera un camp magnètic que produeix una força que s'oposa a la caiguda de l'ímant, per la tercera llei de Newton es pot deduir que el tub hauria d'experimentar una força igual però oposada a la que ralenteix la caiguda de l'ímant. Per això, quan l'ímant cau el dinamòmetre indica un pes superior al pes del tub sol.

Quan ens troben en una situació estacionària, i ja no varia el pes que mesura el dinamòmetre quan cau l'ímant, es pot comprovar que aquest pes correspon al pes del tub i de l'ímant que cau pel tub. A continuació es procedeix a demostrar aquest fet.

Suposem que la massa de l'ímant és m_i i la massa del tub m_t . Quan l'ímant no cau per dins del tub, la massa que mesura el dinamòmetre amb el tub penjat d'aquest és simplement la massa del tub m_t . Quan l'ímant comença a caure dins del tub, la massa mesurada pel dinamòmetre augmenta i el tub es desplaça cap avall una mica. Però arriba un moment en què la massa ja no canvia i el tub deixa de desplaçar-se cap avall, encara que l'ímant estiga caient dins del tub. En aquest cas la força de la gravetat exercida cap avall sobre el tub serà

$$F_{t+i} = (m_t + m_i)g \quad (3.2)$$

la qual està compensada completament per la tensió en els filferros amb que està subjectat el tub (amb l'ímant) al dinamòmetre. Si ara considerem el cas del tub només, sense l'ímant dins, la força de la gravetat en equilibri amb la tensió en els filferros penjats del dinamòmetre serà simplement

$$F_t = m_t g \quad (3.3)$$

Això suggereix que la massa afegida correspon a la massa de l'ímant.

Però com és possible que la massa extra que registra el dinamòmetre quan cau l'ímant corresponga a la massa de l'ímant si aquest no està connectat al dinamòmetre? Doncs, resulta que en la situació estacionària quan l'ímant cau a una velocitat constant per dins del tub, anomenada velocitat "terminal" (com un paracaigudista quan té obert el paracaigudes), la força de repulsió entre el pol "nord" de l'ímant cap avall, i el pol "nord" del camp magnètic creat pel corrent elèctric induït pel pas de l'ímant, cap amunt (vegeu la figura 7), frena l'ímant fins que la força de la gravetat sobre aquest estiga compensada per la força magnètica cap amunt. Així l'ímant continua caient perquè no està subjectat pel dinamòmetre, però cau amb velocitat constant, és a dir, sense acceleració, i d'acord amb la primera llei de Newton que estableix que la resultant de totes les forces sobre un objecte en moviment uniforme ha de ser zero.

Ara, això no ocorre en el cas d'un imant que cau dins un tub de PVC o d'un altre material aïllant, ja que l'imat no pot induir cap corrent elèctric en el tub. Quan l'imat cau dins d'un tub de PVC amb les mateixes característiques que els tubs de coure o d'alumini, la massa del tub que mesura el dinamòmetre no canvia quan l'imat està dins del tub.

Conceptes que cal reforçar o consolidar: Demostrar la relació íntima entre l'electricitat i el magnetisme, ja que s'observa com un flux magnètic variable pot induir un corrent elèctric en un material conductor no magnètic, com és l'alumini o el coure. L'experiment també serveix d'exemple de l'aplicació de la tercera llei de Newton, ja que la força magnètica cap a dalt que frena la caiguda de l'imat dins del tub està compensada per una força cap a baix sobre el tub de coure o alumini, que fa que el dinamòmetre mesure un pes major. La primera llei de Newton garanteix que l'imat cau a una velocitat constant dins del tub, fet que permet deduir que la massa suplementària que mesura el dinamòmetre quan l'imat cau pel tub correspon a la massa del mateix imant.

4. CONCLUSIONS

Els experiments senzills de física són una eina pedagògica destacable en el procés d'ensenyament-aprenentatge. Les experiències noves o sorprenents ajuden a captar l'atenció dels estudiants, de tal manera que s'involucren d'una manera activa en la comprensió del fenomen físic que s'està mostrant. Així poden comprovar les seues hipòtesis inicials, assimilar nous conceptes físics i fer una revisió de les seues idees prèvies. S'ha comprovat que aquest tipus de recurs didàctic fa que el procés d'aprenentatge siga més significatiu i per tant perdure en el temps [Oliva 2008].

Hem presentat dues experiències senzilles d'electromagnetisme degut als problemes que hi ha en la comprensió de conceptes i fenòmens electromagnètics. L'explicació meticulosa d'aquests experiments ens han permet exposar de forma clara diversos conceptes i idees d'electromagnetisme. Hem posat de manifest que l'electricitat i el magnetisme són dos aspectes de la mateixa interacció: l'electromagnetisme. També hem demostrat que un corrent elèctric genera un camp magnètic, i que un camp magnètic variable dóna lloc a un camp elèctric.

5. DIFICULTATS TROBADES, PROPOSTES DE MILLORA I PREVISIÓ DE CONTINUÏTAT

Com a previsió de continuïtat d'aquest projecte d'innovació docent tenim previst prosseguir amb el disseny i l'elaboració d'experiències de física corresponents a diverses àrees d'aquesta matèria.

REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

- Almudí M., Zuza K., Bonet E. (2005) Explicando los fenómenos de inducción electromagnética: Relevancia de su enseñanza y dificultades de aprendizaje. *Enseñanza de las Ciencias* número extra, VII Congreso, 1-5.
- Benegas J. (2007) Tutoriales para Física Introductoria: Una experiencia exitosa de Aprendizaje Activo de la Física. *Latin-American Journal of Physics Education* **1**, 32-38.
- Caamaño A. (1992) Los trabajos prácticos en ciencias experimentales. Una reflexión sobre sus objetivos y una propuesta para su diversificación. *Aula de Innovación Educativa* **9**, 61-68.
- Colombo de Cudmani L., Fontdevila P. A. (1990) Concepciones previas en el aprendizaje significativo del electromagnetismo. *Enseñanza de las Ciencias* **8**, 215-222.
- García-Molina R. (2009) Caída de un imán por un tubo de aluminio. Qüestió número 132 de *Simple+mente física*. <http://bohr.inf.um.es/miembros/rgm/s+mf/132s+mf.pdf>.
- García-Molina R. (coord.) (2011) Monográfico sobre ciencia recreativa. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* **8** (número extraordinari).
- Garzón Florez C. M., Florez A. (2006) Guía para el maestro: Modelo didáctico para la enseñanza del electromagnetismo. *Revista Colombiana de Física* **38**, 1415-1418.
- Griffiths D. J. (2014) *Introduction to Electrodynamics*, 4th ed., Pearson Educational Limited.
- Guisasola J., Almudi J. M., Zubimendi J. L. (2004) Difficulties in learning the introductory magnetic field theory in the first years of university. *Science Education* **88**, 443-464.
- Meneses Villagrà J. A., Caballero Sahelices M. C. (1995) Secuencia de enseñanza sobre el electromagnetismo. *Enseñanza de las Ciencias* **13**, 36-45.

- Mukhopadhyay S. C. (2006) Teaching electromagnetics at the undergraduate level: a comprehensive approach. *European Journal of Physics* **27**, 727-742.
- Oliva J. M. (2008) Ciencia recreativa, educación científica en contextos y mediante recursos no formales, e investigación en didáctica de las ciencias. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* **5**, 1. http://venus.uca.es/eureka/revista/Volumen5/Numero_5_1/Vol_5_Num_1.htm.
- Pramanik A. (2009) *Electromagnetism: Theory and Applications*, 2nd ed., PHI Publisher.
- Sokoloff D. R., Thornton R. K. (1997) Using Interactive Lecture Demonstrations to create an active learning environment. *The Physics Teacher* **35**, 340-347.
- Tipler P. A., Mosca G. (2011) *Física per a la ciència i la tecnologia*. Reverté, Barcelona.